引用格式：曹宏斌, 赵赫, 赵月红, 等. 工业生产全过程减污降碳：方法策略与科学基础. 中国科学院院刊, 2023, 38(2): 342-350, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045. 20220729004.
Cao H B, Zhao H, Zhao Y H, et al. Pollution control and carbon reduction in whole industrial process: Method, strategy and scientific basis. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(2): 342-350, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220729004. (in Chinese)

工业生产全过程减污降碳：方法策略与科学基础

曹宏斌* 赵 赫 赵月红 张 笛

1 中国科学院过程工程研究所 北京 100190
2 中国科学院化学化工科学数据中心 北京 100190
3 中国科学院大学 化学工程学院 北京 100049

摘要 随着我国环境保护排放标准日益严格及行业园区化发展日渐成型，有毒有害污染物稳定达标与碳减排协同治理技术缺乏、末端无害化治理控制成本高等问题，开始严重制约我国社会经济可持续发展和碳达峰、碳中和目标的实现。文章以工业行业的重大环境保护需求为导向，提出“工业生产全过程减污降碳”的方法策略及科学基础。通过控制方法协同、跨介质协同，以及多领域统筹、多要素统筹建模优化，将分子水平或微观水平上的基础科学创造性发现与工程研究开发直接联系起来，为减污降碳协同增效提供新的科学支撑，为我国工业绿色发展和碳减排贡献理论方法。

关键词 工业污染，全过程控制，减污降碳，多尺度，集成优化

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220729004

我国重化工行业涉及产品种类繁多、原料来源广泛、工艺流程长、产污环节多，具有排污量大、污染负荷高、复合污染突出，以及毒性强、碳排放强度大等基本特征。据《中国环境统计年鉴》报道[1-3]，钢铁、石化、有色、纺织、造纸、食品加工、制药、皮革八大行业的化学需氧量（COD）与氨氮排放占比均达到77%，汞、镉、铬（六价）、铅、砷等金属或类金属等毒性污染物排放约占86%（表1）。

工业碳排放占我国总碳排放约68%（包括间接排放）[4]，而钢铁、有色、化工等几大行业碳排放总量已占据工业排放总量的56%左右[4]，碳减排任务艰巨。当前，我国生态文明建设同时面临实现生态环境根本好转和碳达峰、碳中和（以下简称“双碳”）两大战略任务。我国“气十条”“水十条”“土十条”

*通信作者

资助项目：国家自然科学基金重点基金项目（51934006）
修改稿收到日期：2022年12月9日

提出了专项整治“十大重点行业”中焦化、造纸、有色等行业清洁化改造及转型升级。2020年9月，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的目标，随后该目标被纳入《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》。《2030年前碳达峰行动方案》提出了推动工业领域绿色低碳发展，推动钢铁、有色金属等行业碳达峰。党的二十大报告提出了“统筹产业结构调整、污染治理、生态保护、应对气候变化”，以及“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”的重要指示。我国正处于跨越式发展的经济高速增长阶段，而工业污染控制与碳减排是迫切需要解决的重大难题，协同推进工业减污降碳已成为我国新发展阶段经济社会发展全面绿色转型的必然选择。

目前随着环境保护排放标准日益严格及行业园区化发展日渐成型，有毒有害污染物稳定达标处理关键技术缺乏、末端无害化治理控制成本高等问题，成为制约行业可持续发展的重大瓶颈。由于生产过程减排效果差，毒性化学品原料及生产过程产生的众多有毒中间体结构复杂难转化，产品分离的能耗高、分离不彻底，进入末端后导致污染与碳排放，对生态环境造成极大的破坏。另外，由于源头减排作用发挥不够，以末端控制经验组合工艺为主要手段的污染处理成本居高不下，成为又一大突出问题。以钢铁行业为例，目前吨钢的污染处理成本达到200—300元，占钢铁生产总成本的10%左右，若未来加入碳市场交易，预计成本将接近400元[5,6]。为了满足不断提高的环境保护标准与碳排放要求，很多企业只能低利润生产。

应对全球性重大挑战背后的核心科学问题研究范畴已从传统理论上升为复杂科学，从追求细节发展到尺度关联，从多层次的分科知识演变到探索共性原理[7]。因此，深刻认识基础研究的重要作用和时代特征，深入探索复杂尺度的共性原理问题，具有重要意义。目前，环境污染物和碳排放高度同根同源的内在规律不明，在微观尺度的污染物转化机理及形态理论仍不清楚。面对生态文明建设新形势新任务新要求，减污降碳内在规律的深入研究需求进一步凸显。在基础科学层面上，通过深入揭示物质转化过程中组成—结构—性质的影响，创建高效、清洁、节能、经济的物质转化工艺、过程和系统，是未来可持续工业亟待解决的难点问题。

表1　我国重点工业行业典型污染物与碳排放情况[1-4]

Table 1　Typical pollutant discharge of key industries in China[1-4]

类别		挥发酚（吨）	氰化物（吨）	化学需氧量（吨）	石油类（吨）	氨氮（吨）	一类重金属（吨）	二氧化硫（万吨）	氮氧化物（万吨）	危险废弃物（万吨）	二氧化碳排放（亿吨）
重点行业	冶金	51.9	38.8	19 967	2 114	1 836	230.3	117.27	139.365	2 264.8	21.5
	化工	93.3	88.5	133 510	1 706	9 048	58.0	47.35	68.4	2 773.6	10.0
	制药	23.3	0.1	29 712	182	1 621	0.08	1.04	1.41	176.0	0.5
	轻工	47.7	9.1	316 634	643	11 775	8.4	11.58	13.25	295.1	3.9
	纺织	4.0	0	96 511	143	2 768	0.9	1.89	2.78	10.36	1.8
重点行业总排放		220.2	136.5	596 334	4 787	27 048	297.7	179.14	225.2	5 519.8	37.7
工业总排放		1 134.8	241.8	771 611	10 139	34 911	344.9	395.37	548.07	8 125.9	67.3
重点行业占工业总排放比例		19%	56%	77%	47%	77%	86%	45%	41%	68%	56%

针对当前我国环境科技发展现状及未来经济社会发展对工业污染控制的重大需求，在充分借鉴国内外工业污染治理相关先进理念与高新技术的基础上，通过科技工作者不懈努力、上下求索、开拓创新，“工业污染全过程控制”策略框架已基本形成[8,9]，全过程控污已成为高效解决重化工行业污染问题的发展趋势。本文在国家“双碳”重大战略布局下，进一步提出并阐释了工业生产全过程减污降碳的基本理念及科学内涵，针对工业全过程减污降碳缺乏基础数据和理论指导难题，阐明具体方案策略，旨在为致力于工业污染治理的科研人员以及企业技术人员提供切实有效的理论与方法。

1 工业生产全过程减污降碳理念

工业生产全过程减污降碳以工业过程的综合成本最小化为目标，其科学内涵是：依据系统工程、循环经济、绿色化学、清洁生产及生命周期评价等理论和方法，综合运用最佳可行技术和最佳环境实践（BAT/BEP），执行和（或）制（修）订相应环境法律法规，确保以最少的人力、物力、财力、时间和空间，实现工业生产综合成本最小化；实现工业全过程废弃物的减量化、资源化、无害化；实现工业生产的低碳化、绿色化、智能化；实现人与自然和谐相处永续发展[8]。工业生产全过程减污降碳是在不同维度的协同控制（图 1），包括控制方法协同、跨介质协同、多领域统筹与多要素统筹。

1.1 源头—过程—末端控制方法协同

工业污染及能耗主要来源于原料（介质）或生产过程，通常比较复杂，现有污染控制体系与生产过程脱节，缺乏协同考虑生产工艺过程中物质、资源循环，资源和能源不能在生产过程中得到充分利用，导致了企业原材料消耗、耗水量、碳排放和产品成本居高不下等问题，亟待通过生产源头深度分离实现污染高效资源回收。

工业生产全过程减污降碳通过污染成因及原料部分生命周期分析对污染物来源及碳素流进行全面解析，基于清洁原料替代、物质转化原子经济性及循环经济等清洁生产概念进行源头污染控制；同时，结合系统工程和最优化方法设计资源高效分层多级利用，强化资源能源回收过程，并通过低成本无害化处理使综合毒性风险降低，最终建立源头减废降碳、过程控制、废物资源化与末端治理一体化的减污降碳全过程控制系统。

1.2 气—液—固污染跨介质协同

近年来，污染跨介质迁移转化问题凸显。水体、大气和土壤紧密关联，相互影响，“水污染控制”“大气污染控制”和“土壤污染控制”的学科分化，导致边界固化，往往是“头痛医头、脚痛医脚”，致使污染物并非从环境中去除，而是在气、液、固介质中相互传递，增加了环境质量改善的难度。跨介质污染由于缺少统一的联合治污机制，治污脱节现象比较严重。工业生产全过程减污降碳从多介质协同治污、多污染物—碳排放协同控制、区域统筹治污等方面入手，率先加强重点行业污染成因的基础性和系统性研究，探明主要污染物的跨介质关键循环

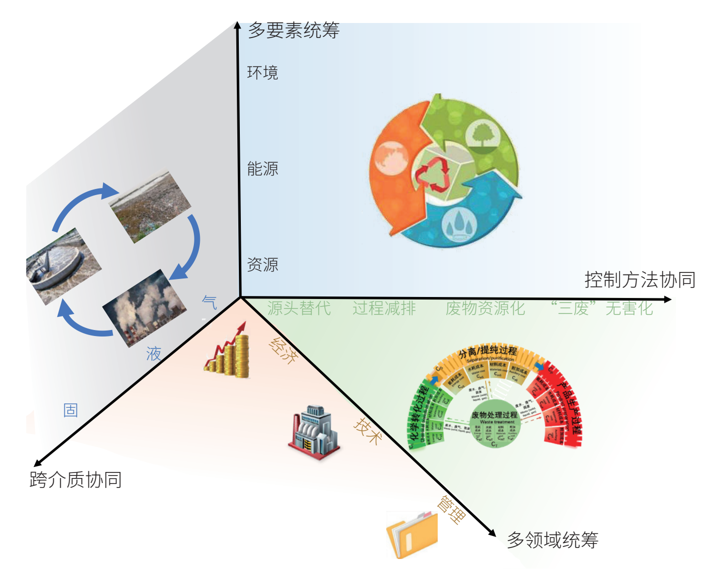


图 1　工业生产全过程减污降碳的理念

Figure 1　Concept of pollution control and carbon reduction in whole industrial process

过程及其生态环境效应，研究废气—废水—固废污染物多介质调控与治理机理，建立高效、经济、安全的污染多介质组合技术优化协同整治机制，为跨介质污染—碳排放协同控制技术提供基础理论支撑。

1.3 经济—技术—管理多领域统筹

环境管理是国家实施可持续发展战略的重要保障。目前，环境技术对环境管理间的衔接有待完善，缺乏完备的环境技术支持体系和管理机制；同时，缺乏有效的行政手段和经济手段使企业污染治理行为变被动为主动，亟须加速环境防治能力建设，促进环境技术的创新与发展，为我国的环境管理和环境保护提供技术支撑。工业生产全过程减污降碳统筹经济、技术、管理 3 个层面，对各个污染控制过程提供技术支持，推进低碳技术创新，同时也为环境管理目标的设定，以及环境管理制度的实施提供数据支持。确保碳排放有效削减和污染物排放稳定达标，支撑执行和（或）制（修）订相应环境法律法规，支撑建立技术政策、可行技术指南和工程规范等行业技术指导文件体系，以及建立“双碳”目标管理的环境技术示范推广平台，实现工业生产综合成本最小化，创造显著的社会环境经济效益，引领企业主动治污。技术可行、经济可达、管理完善的统筹理念将有利于进一步促进和协调环境保护、绿色发展决策和经济社会发展之间的联系。

1.4 资源—能源—环境多要素统筹

由于人口的快速增长，以及随之发展的经济模式对资源的过分依赖，导致我国一些重要自然资源的可持续利用和保护正面临着严峻的挑战。我国“双碳”目标不仅在于节能减排，背后更大的意义在于推动社会向绿色发展转型，实现能源高效利用、清洁能源开发、生产方式和产业结构转变。从产业结构看，我国工业结构以重化工业为主导，决定了现阶段经济社会活动需要消耗大量的能源资源。人均能源资源相对不足是中国经济、社会可持续发展的一个限制因素，其中水资源短缺和能源紧张的问题较为突出。传统的发展模式消耗资源多、产生污染大，经济增长与环境保护的矛盾十分尖锐。工业生产全过程减污降碳将资源能源及环境保护放入工业发展全局进行统筹考虑，发展传统能源的清洁高效利用技术，降低碳排放；合理配置资源，提升水的利用效率，使用最优化方法寻求最佳资源高效分层多级利用技术路径，强化资源回收过程；并通过低成本无害化处理使综合毒性风险降低，实现资源能源环境统筹下的节水节能与低碳污染减排。

2 工业生产全过程减污降碳的关键科学问题

工业生产全过程减污降碳是一个大型的复杂过程系统综合问题，其实现的核心是统筹多个单元（或装置）、多个尺度（分子、单元、系统），突出系统思维，挖掘协同效应，实现污染控制和碳减排协同，追求产品生产和废物处理—碳减排的总成本最低。*① 在分子尺度，*通过精准识别污染物与含碳物质，尤其是含碳污染复合物的形态结构、性质及其相互作用关系和调控方法，建立构效关系预测模型；*② 在单元尺度，*系统梳理不同技术创新的减污降碳机理，分析研究典型操作单元设备结构和操作条件对污染物与含碳物质转移转化的影响规律、碳污耦合特征，提出反应—传递协同调控策略，建立过程单元构效关系预测模型；*③ 在系统尺度，*进行全过程技术组合，发展全过程减污降碳超结构优化模型，研究生产过程、控污过程与碳排放之间的相互作用关系和多单元过程组合机制，建立流程尺度的构效关系预测模型。通过以上关键科学问题的研究，逐步建立工业全过程减污降碳集成优化软件工具，直接支撑重点行业减污降碳技术创新和过程集成，帮助寻求最佳系统减污降碳方案，从而实现工业生产局部与整体之间、经济效益与环境影响之间的协同优化（图 2）。

2.1 分子尺度

工业生产全过程减污降碳在分子尺度的科学基础

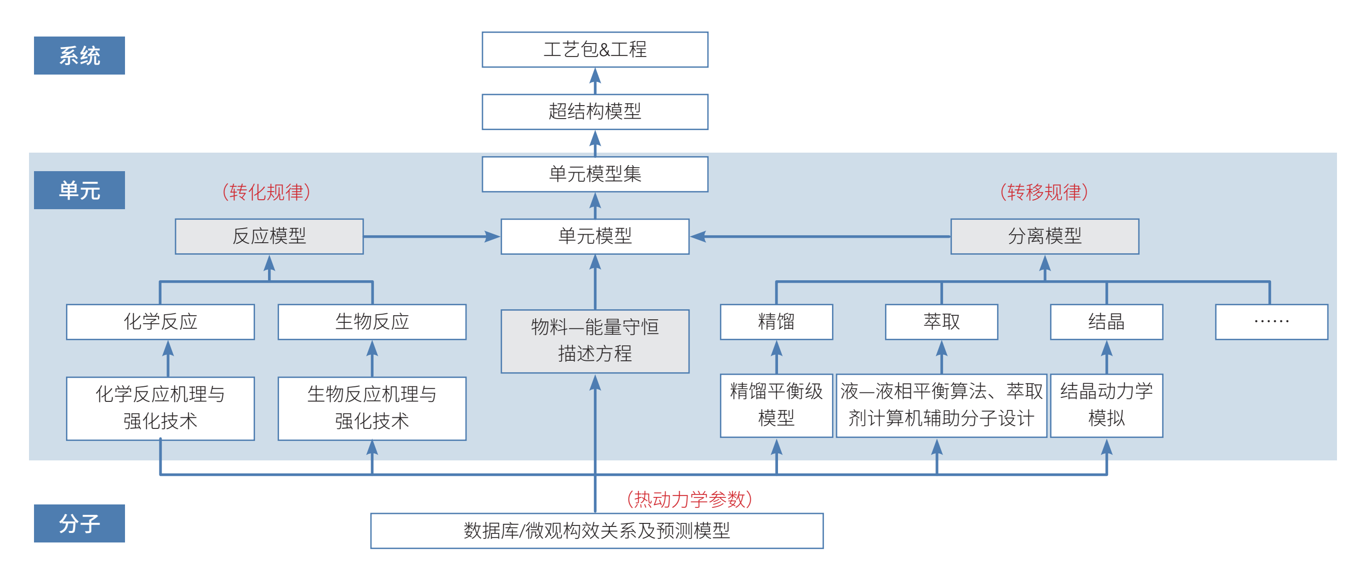


图 2　分子到系统多尺度减污降碳设计流程

Figure 2　Molecular-unit-system design process for multi-scale pollution control and carbon reduction

为在微观尺度上辨识关键离子/分子赋存形态，深入认识其形态结构特征、相互作用关系和迁移转化规律，构建构效关系预测模型，以指导相关介质（催化剂、药剂、溶剂等）的设计筛选及其在宏观单元操作过程中的转移转化定向调控，从而实现源头减污降碳。

微观尺度涉及的研究对象包括分子、离子、自由基、官能团等，它们之间的相互作用关系包括化学键、氢键、静电作用、配位键、范德华力相互作用等。其基本结构描述符包括前线轨道、生成焓、自由能等，建立的模型方程主要有热力学、动力学等模型（图 3）。目前，有多种科学计算软件，如量子化学、分子动力学、介观动力学等方面的计算软件，可以支撑相关的微观尺度构效关系研究。

工业生产全过程减污降碳分子尺度优化的关键在于建立合适的物化性质、热/动力学和互作参数预测模型，以便于微观—宏观尺度模型的耦合，从而实现二者的协同优化。但微观尺度的计算往往模型复杂、耗时长，且求解难度大，直接与宏观尺度模型耦合往往会造成求解困难，目前也未形成系统的方法和软件工具。考虑到机器学习处理复杂问题的优势，可利用“大数据+人工智能”技术，以基于微观尺度严格模拟的微观体系数字孪生作为数据生成器，低成本生成训练机器学习/人工智能（ML/AI）模型所需的大量数据，以开发适用于跨尺度耦合的构效关系预测模型。

2.2 单元尺度

工业生产全过程减污降碳在单元尺度的科学基础为在理论分析和实验研究基础上，深入认识单元操作污染、碳排行为及其相互作用规律，构建其构效关系预测模型，以指导设计和操作参数的优化，从而实现过程减污降碳。

单元尺度涉及的研究对象包括转化、分离、产品加工、污染处理等工业过程从原材料到产品的几大单元流程[10]。单元过程的相互作用关系包括质量传递、

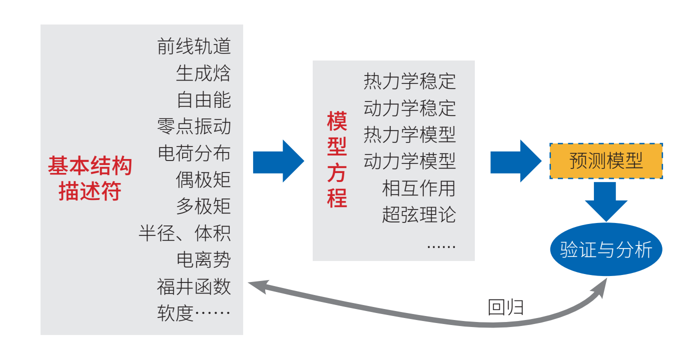


图 3　数据驱动的微观尺度构效关系预测模型示意图

Figure 3　Schematic diagram of data-driven prediction model for structure-activity relationship at micro scale

动量传递、能量传递与反应过程等（图4）。其中，在化学转化过程中，需把制造产品所用的原材料预先进行必要的化学前处理，此阶段产品从相应的原材料中提取出来，以便于后续进行分离纯化过程；分离纯化过程则是为了去除目标材料中的杂质成分，提升最终目标产品纯度；在分离纯化过程之后，根据产品种类和设备条件以及环境保护要求，采用最佳实用技术制备产品；在以上几个生产过程中所产生的气体、液体和固体废弃物都需要进入污染处理单元进行回收利用或无害化处理，同时会产生相当的碳排放。

工业生产全过程减污降碳单元优化的关键在于单元模型构建的基础上，通过系统尺度的集成优化获得最佳的单元间衔接关系和协同调控方法。主要手段包括通过持续的单元技术创新，如介质强化（催化剂、药剂、溶剂等）、装备强化（设备、材料、控制等）、外场强化（电、超重力、光、等离子等）等方法，提升单元能源、资源利用效率，以实现过程减污降碳。需要指出的是，与目前单纯聚焦某一单元创新的习惯方法不同的是，全过程减污降碳强调在单元技术创新阶段就要考虑与其他单元的集成，以通过单元间的协同优化来预防或减少污染物的产生与碳排放，突出系统思维。考虑到工业过程大都表现出很强的非线性行为，我们建议采用“机理+数据”双驱动方法，兼顾机理和数据驱动建模的优势，提高单元模型的可解释性和适用性。

2.3 系统尺度

工业生产全过程减污降碳在系统尺度的科学基础为在深入认识各单元技术耦合关系的基础上，利用过程系统工程理论和方法，构建系统超结构优化模型，解析系统尺度的减污降碳协同效益及其关键驱动要素，从而实现全过程物质—能量优化匹配，获得全局最优的减污降碳技术路径。

系统尺度涉及的研究对象为单元过程，其相互作用关系为物质—能量的优化匹配。工业生产过程各个单元相互联系和相互影响。例如，原料的纯度影响到反应过程；转化单元操作条件改变，将改变反应产物组成，进而影响到分离单元的操作，最终影响产品产出，以及废弃物产生和碳排放量。过程单元层次的优化措施往往并不一定能带来系统层次的最佳效果。从整体出发，在系统尺度上进行过程集成优化，发掘协同效应，经济合理地利用，才能实现全局最优的减污降碳效果。工业生产全过程减污降碳理论将生产全过程作为一个整体考虑，以综合成本最小为目标，将生产过程单元（转化、分离、产品加工等）归类为操作单元，将污染处理单元归类为处置单元，对单元处理技术进行集成（图5）。通过能量、物质和水资源的供应和利用过程的优化配置，量化分析所有可行工业生产工艺及碳减排激励和管理政策等不确定性因素的影响，寻求污染物稳定达标排放、碳排放量最小及综合生产成本最低的减污降碳技术路径。

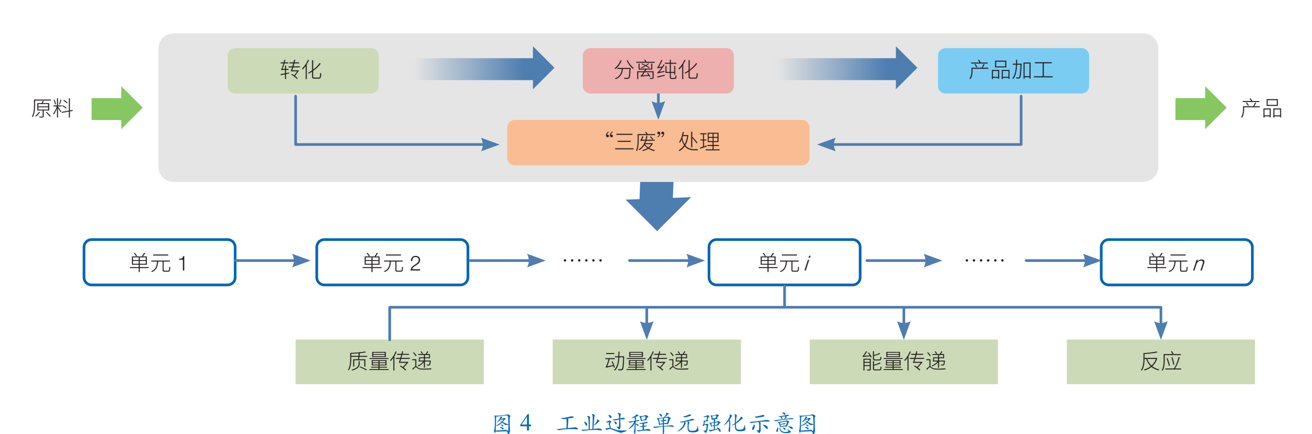


图4　工业过程单元强化示意图
Figure 4　Schematic diagram of industrial process unit reinforcement

工业生产全过程减污降碳系统优化的关键在于生产过程和末端治理过程重点物质转移转化规律、污碳耦合机制、生产—末端相互作用关系、全过程减污降碳方案超结构等的模型描述，进而构建系统尺度优化模型。系统优化是一个多尺度、多目标的大规模复杂混合整数非线性规划（MINLP）优化问题，由于在优化模型中引入多个尺度，以及各尺度间的相互作用的模型描述，导致模型复杂。例如：分子设计和单元/工艺流程设计模型引入的离散变量，优化问题求解空间大幅增加；描述相互作用时，可能引入强非线性函数，造成求解难度增大；以及多尺度模型耦合时模型规模快速膨胀等。目前，还缺乏具有一定普适性的支持全过程减污降碳的优化建模和求解方法，仍采用模拟试算模式，依赖于专家经验，亟须系统的软件工具的支持。这也是全过程减污降碳研究的重点内容之一。

3 工业应用与展望

本文基于工业生产全过程减污降碳基本原理，提出以技术组合网络拓扑超结构设计为基础的分子—单元—系统多尺度优化建模思路，创建了综合成本最小化，兼顾减污降碳需求的多单元集成优化模型，攻克不同尺度间参数传递、复杂过程建模及复杂非线性优化模型求解等难题，实现了典型工业过程污染和碳排放的全景多尺度模型描述，研发出钢铁冶金、煤化工等近20个重化工多单元集成优化模型，实现了集成工艺快速评价和优化，成果已应用于焦化、废锂电池处理、电解铝等行业的绿色升级。

在焦化行业，基于高浓度分离—可降解生物矿化—低浓度难降解高级氧化的污染控制基本原则，在焦化废水处理关键单元技术典型污染物迁移转化规律研究及相关技术经济评估的基础上，建立焦化废水全过程高效、低成本强化处理综合方案的工艺流程模型，实现废水处理流程操作与废水合理回用的协同优化。基于该模型，获得最小废水处理成本条件下，焦化废水处理流程的优化操作参数和回用方案。

指导研发了酚油协同萃取减毒耦合污染物梯级生物降解的废水处理新工艺（图6），建立了全过程集成优化的焦化废水低成本稳定控污成套技术，实现污染物深度脱除和系统稳定、低成本运行的目标。突破产业化放大工程技术瓶颈，实现大规模推广应用。本工艺主要包括酚油萃取协同解毒、精馏—生物耦合脱氮脱碳、适度氧化高效混凝脱氰脱色、非均相催化臭氧氧化、多膜组合脱盐等关键技术。该工艺按照工业生产全过程减污降碳的思路设计工艺路线，不仅成本低，而且稳定可靠。

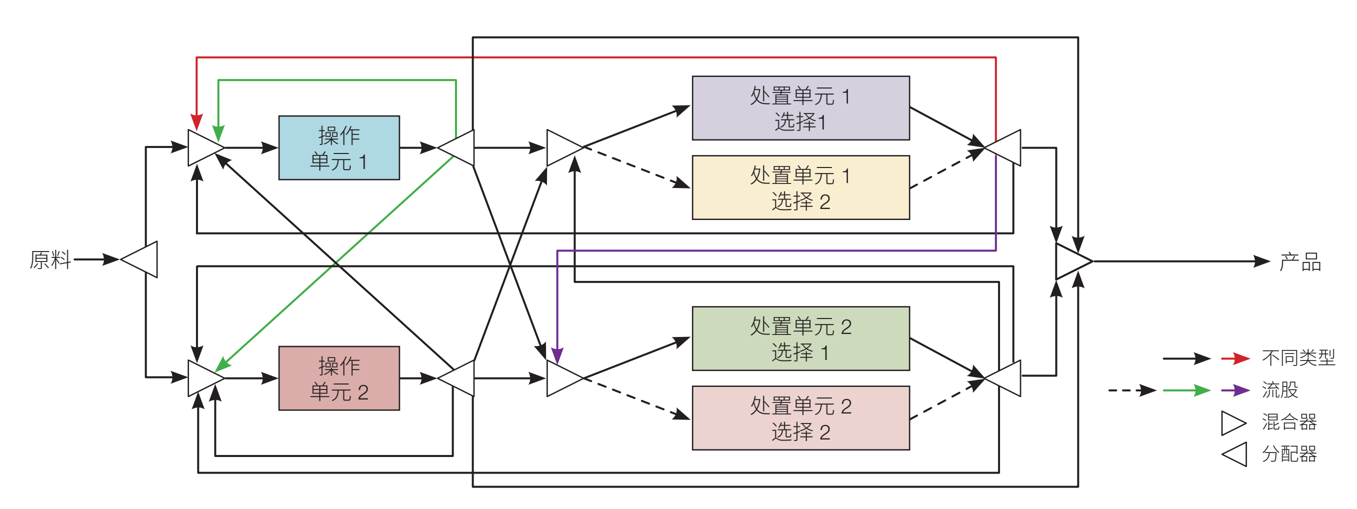


图5　工业生产全过程系统集成优化示意图

Figure 5　Schematic diagram of system integration optimization for whole industrial process

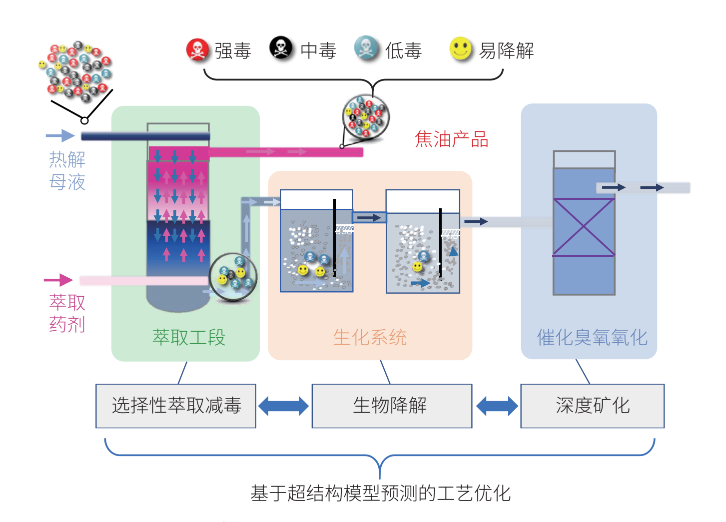


图 6　基于超结构模型预测的工艺优化案例

Figure 6　Process optimization case based on superstructure model prediction

针对绿色低碳发展的需求，未来我国亟待将过程工业与大数据和机器学习等信息技术深度融合，进行工业行业碳排放及碳中和技术相关数据资源建设和模型描述，以原料到产品的生产全过程为对象，以技术创新为基础，以全流程全局优化智能寻优，贯穿工艺、过程/装备和系统多个层面的研究开发，从而构建以需求驱动的敏捷供应链。其中，发展全过程优化软件平台及数据库，建成全过程智能控制优化平台及绿色智能无人工厂系统，为代表性行业提供绿色低碳过程制造智能优化系统解决方案是我们进一步工作的目标。基于软件平台与数据库的逐步建立和完善，工业生产全过程减污降碳研究将以综合成本最小化为目标，以水—物—能增值循环为核心、实现不同层级的污染物/水/能量的信息大数据集成、能量/水梯级利用与人工智能决策，打破行业间、领域间的壁垒，助力传统单一行业减污降碳向上下游产业链协同减污降碳、数字化减污降碳的方向转变。

参考文献

1 中华人民共和国国家统计局，中华人民共和国环境保护部. 2016年中国环境统计年鉴. 北京：中国统计出版社，2016.

National Bureau of Statistics of the PRC, Ministry of Environmental Protection of the PRC. China Statistical Yearbook on Environment 2016. Beijing: China Statistics Press, 2016. (in Chinese)

2 中国环境保护数据库. [2022-12-27]. http://hbk.cei.cn/aspx/default.aspx.

China Environment Production Database. [2022-12-27]. http://hbk.cei.cn/aspx/default.aspx. (in Chinese)

3 中华人民共和国国家统计局，中华人民共和国环境保护部. 2011年中国环境统计年鉴. 北京：中国统计出版社，2011.

National Bureau of Statistics of the PRC, Ministry of Environmental Protection of the PRC. China Statistical Yearbook on Environment 2011. Beijing: China Statistics Press, 2011. (in Chinese)

4 张锁江，张香平，葛蔚，等. 工业过程绿色低碳技术. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 511-521.

Zhang S J, Zhang X P, Ge W, et al. Carbon neutral transformative technologies for industrial process. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 511-521. (in Chinese)

5 崔志峰，徐安军，上官方钦. 国内外钢铁行业低碳发展策略分析. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1496-1506.

Cui Z F, Xu A J, Shangguan F Q. Low-carbon development strategy analysis of the domestic and foreign steel industry. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(9): 1496-1506. (in Chinese)

6 尤丽霞. A钢铁企业环境成本控制案例研究. 石家庄：河北经贸大学, 2022.

You L X. A Case Study on Environmental Cost Control of A Iron and Steel Enterprise. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Business, 2022. (in Chinese)

7 Li J H. Exploring the logic and landscape of the knowledge system: Multilevel structures, each multiscaled with complexity at the mesoscale. Engineering, 2016, 2: 276-285.

8 Cao H B, Zhao H, Zhang D. et al. Whole-process pollution control for cost-effective and cleaner chemical production—A case study of the tungsten industry in China. Engineering, 2019, 5: 768-776.

9 张笛, 曹宏斌, 赵赫, 等. 工业污染控制发展历程及趋势分析. 环境工程, 2022, 40(1): 1-7, 206.
Zhang D, Cao H B, Zhao H, et al. The development course and trend analysis on industrial pollution control. Environmental Engineering, 2022, 40(1): 1-7, 206. (in Chinese)

10 张天柱, 石磊, 贾小平. 清洁生产导论. 北京: 高等教育出版社, 2006: 5.
Zhang T Z, Shi L, Jia X P. Introduction of Cleaner Production. Beijing: Higher Education Press, 2006: 5. (in Chinese)

Pollution Control and Carbon Reduction in Whole Industrial Process: Method, Strategy and Scientific Basis

CAO Hongbin* ZHAO He ZHAO Yuehong ZHANG Di

（1 Institute of Process Engineering, Innovation Academy for Green Manufacture, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2 Chemistry & Chemical Engineering Data Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3 School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract As China's environmental protection emission standards are becoming stricter and industrial parks are taking shape, problems such as the lack of stable cooperative treatment technology for toxic pollutants and carbon emission reduction, and the high control cost seriously restrict the sustainable development of economic society and the realization of the strategic goal of carbon emission reduction. Guided by the major environmental protection demand of industries, this study put forward the method, strategy and scientific basis of "Synergistic reduce pollution and carbon in the whole process of industry". Through the coordination of control methods, cross-media, multi-field and multi-factor modeling optimization, the creative discovery of basic science at molecular level was directly linked with engineering research, which provided new scientific support for the synergy reduction of pollution and carbon emission, and contributed theoretical methods to China's industrial green development.

Keywords industrial pollution, whole process control, pollution control and carbon reduction, multiscale, optimization

曹宏斌 中国科学院过程工程研究所研究员。主要研究领域：工业有毒有害污染全过程控制。E-mail: hbcao@ipe.ac.cn

CAO Hongbin Professor of Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on the whole process control of industrial toxic and harmful pollutants. E-mail: hbcao@ipe.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author